

非可換エニオンの電氣的光学的制御

Electrical and optical creation and control of non-Abelian anyons

課題番号：19H05610

樽茶 清悟（TARUCHA Seigo）

理化学研究所・創発物性科学研究センター・グループディレクター



研究の概要（4行以内）

安定で制御性の高い非可換エニオンが発現する候補系として、（1）二重ナノ細線-超伝導体接合、2次元トポロジカル絶縁体-超伝導体接合、（2）3次元トポロジカル絶縁体-超伝導体接合、（3）マイクロ共振器の励起子ポラリトン、などを用いてエニオンの生成法を開発し、その物理的性質と量子計算への応用の可能性を探求する。

研究分野：磁性、超伝導および強相関系関連

キーワード：非可換エニオン、トポロジカル超伝導、マヨラナ粒子、励起子ポラリトン

1. 研究開始当初の背景

3次元系の粒子は、交換に対して位相変化が 0 か π でボゾンかフェルミオンに分けられる。しかし、2次元以下の系では位相変化が任意の粒子、エニオンが存在する。その中で非可換統計性のエニオンは、新奇な統計性の研究対象として、またトポロジカルに保護された理想的な量子コンピュータの構成要素として注目されている。しかし、従来のエニオンには安定性、制御性に問題があり、核心の概念、技術には未だ手が付いていない。

2. 研究の目的

（1）1次元トポロジカル超伝導、（2）2次元トポロジカル超伝導、（3）共振器励起子ポラリトン、をエニオン（マヨラナフェルミオン）生成の候補系として、制御性の良い生成・操作法の開発、及び非可換性とトポロジカル保護の物理の解明を目指す。

3. 研究の方法

（1）では並列二重ナノ細線や2次元トポロジカル絶縁体（WTe₂）と超伝導体の接合を作り、高周波測定を用いてマヨラナ粒子を実証するとともに、生成に関与する物理を解明する。また、トポロジカル相の安定性に対する電子間相互作用の影響を理論解明する。（2）では3次元トポロジカル絶縁体と超伝導体の平面接合、コルビノ接合を用いて、渦状態とエニオン生成の関係を解明し、また、電流駆動の渦操作によるエニオンの交換操作を実現する。（3）マイクロ共振器ポラリトンの強閉じ込めと光操作を用いてトポロジカ

ル状態、その極限として分数量子ホール状態（エニオン）を実現し、光によるエニオン励起・交換の技術を開発する。

4. これまでの成果

（1）並列二重ナノ細線-超伝導体接合における無磁場マヨラナ粒子生成に関与する超伝導接合の基本特性を評価した。同粒子の生成機構である、二重ナノ細線に対する弾道的なクーパー対分離に関して、1次元電子相互作用のために「非局所近接超伝導のエネルギーが局所超伝導より大きい」という必要条件が満たされることを確認した。また、InAs量子細線の測定から、1次元電子間相互作用が強く働くこと、スピン軌道相互作用の影響は非常に小さいことを実験理論の普遍的性質として解明した。さらに、クーパー対分離の実験で検証された、二本のナノ細線にまたがる非局所近接超伝導の物理とその制御原理を調べるために非局所ジョセフソン効果を測定した。その結果、非局所超伝導を通して片側の接合をもう片側の位相差により制御する新技術を確立した。

平行してマヨラナ粒子の検出手法の一つである高周波応答の性質を調べ、単一ナノ細線ジョセフソン接合の測定で、半整数倍のシャピロ階段を観測した。数値計算との比較や温度依存性、ゲート電圧依存性から、この半整数倍の階段が電子の弾道性に起因することを解明した。一方、近年疑義がある「自己形成の単一ナノ細線-超伝導体接合に磁場を印加してマヨラナ粒子を実現する系」に関して調べた。同粒子の証拠とされる、ジョセフ

ソソ接合での磁場誘起の超伝導電流の増強を詳細に調べ、超伝導電極中に侵入する磁束渦が準粒子を捕獲することに起因することを突き止めた。

単層の WTe₂ 膜を用いてゲート誘起型のジョセフソン接合の作製技術を開発した。さらに、ジョセフソン接合デバイスの基礎となるアンドレーエフ束縛状態のマイクロ波分光を行うために、rf-SQUID デバイスをサファイア基板上のマイクロ波共振器に結合するフリップチップ技術を開発した。この技術で作製したデバイスを用いて、InAs ナノ細線ジョセフソン接合におけるアンドレーエフ束縛状態の分散を検出し、また HgTe 接合における状態の散逸を明らかにした。

理論に関して、スピン軌道結合によって作られたヘリカル磁場中の複数サブバンドを持つ量子細線の普遍的な輸送特性と分数励起を示す新しい機構を解明した。また、ある占有率では、ヘリカル磁場と電子間相互作用の組み合わせにより、高次の散乱過程が可能になることを反映して普遍的な伝導度ディップが発現することを見出した。この観測は分数量子ホール状態に似た分数励起をもつ強相関フェルミオン系の形成を意味する。

(2) ゲート制御可能な 3 次元トポロジカル絶縁体 BiSbTe のジョセフソン接合を作り、シャピロ階段の測定を行った。この結果、ゲートにより階段の長さなどは依存するものの、すべての電圧領域において奇数倍のシャピロ階段が消失しないことを観測した。解析の結果、マヨラナ粒子検出にはデバイス構造からくる電気回路的性質を考慮する必要があることが分かった。加えて、コルビノ型ジョセフソン接合の輸送特性の実験において、三角形の特異な磁場依存性を観測し、その解析からジョセフソン渦の半径を評価した。

(3) 安定なポラリトントポロジカル相の生成に向けた技術開発を行った。まず、小さい捕捉構造を導入して閉じ込めを強化することにより、共振器中のポラリトン相互作用を増強する手法を開発し、次に、ポラリトンの縦方向フローを光で制御する技術を確認した。このほか、カゴメ格子中のポラリトンのエッジ、バルク輸送の光学測定実験を行い、平坦バンド中のポラリトンダイナミクスを明らかにした。

5. 今後の計画

(1) マヨラナ粒子の生成・制御に適した構造として、選択的成長型のナノ細線の超伝導接合を検討する。一方、観測法としてはシャピロ階段と相補的なジョセフソン放射の測定技術、及び新しい制御技術を開発する。また、量子井戸試料を用いて非局所近接超伝導の物理を開拓する。

WTe₂ ジョセフソン接合における RF 輸送特性を明らかにするとともに、開発したフリッ

プチップ共振器を用いて、新しい系におけるアンドレーエフ束縛状態を分光測定する。

2 次元トポロジカル絶縁体、高次トポロジカル絶縁体のヘリカル状態におけるマヨラナ束縛状態の実現可能性を理論的に調べる。

(2) デバイス構造を最適化した 3 次元トポロジカル絶縁体ジョセフソン接合でシャピロ階段・ジョセフソン放射を測定し、マヨラナ粒子を検出する。コルビノ接合に関しては清浄な試料を用いて基本の物理を解明し、ジョセフソン渦の制御可能性を調べる。

(3) ポラリトン分数量子ホール状態の実現へ向けて、ポラリトントポロジカル格子、光誘起ゲージ場、強閉じ込めによる相互作用増強などの技術を集約する。

6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む) 主要論文 (2019.7-2021.3)

1. K. Ueda, S. Matsuo, H. Kamata, Y. Sato, Y. Takeshige, K. Li, Lars Samuelson, H. Xu, and S. Tarucha, “Evidence of half-integer Shapiro steps originated from nonsinusoidal current phase relation in a short ballistic InAs nanowire Josephson junction”, *Phys. Rev. Research* 2, 033435-1 – 033435-8 (2020).

2. S. Matsuo, M. Tatenno, Y. Sato, U. Ueda, Y. Takeshige, H. Kamata, J.S. Lee, B. Shojaei, C.J. Palmstrom, J. Christopher, and S. Tarucha, “Evaluation of the vortex core size in gate-tunable Josephson junctions in Corbino geometry”, *Phys. Rev. B* 102, 045301-1 – 045301-5 (2020).

3. C.H. Hsu, P. Stano, Y. Sato, S. Matsuo, S. Tarucha, and D. Loss, “Charge transport of a spin-orbit-coupled Luttinger liquid”, *Phys. Rev. B* 100, 195423-1 – 195423-17 (2019).

4. K. Ueda, S. Matsuo, H. Kamata, S. Baba, Y. Sato, Y. Takeshige, K. Li, S. Jeppesen, L. Samuelson, H.Q. Xu, and S. Tarucha, “Dominant nonlocal superconducting proximity effect due to electron-electron interaction in a ballistic double nanowire”, *Science Advances* 5, eaaw2194-1 – 2194-6 (2019).

他に論文 5 編、招待講演 16 件、国際会議発表 7 件、国内会議発表 4 件。

受賞

・ Ch.-H. Hsu 12th Research Incentive Award (RIKEN Ohbu Award), RIKEN 2021/3/17

・ 松尾貞茂 第 33 回安藤博記念学術奨励賞 (一般財団法人安藤研究所) 2020/10/17

他 1 件

プレスリリース

「初めてクーパー対を 2 本の細線に弾道的に分離」 2019/10/5

7. ホームページ等

<http://qfsrcg.riken.jp/>